

混合セメントを考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式

渡辺 健* 中村 麻美* 石田 哲也** 渡邊 忠朋***

Prediction Equation for Shrinkage Strain of Concrete Considering the Effect of Mixed Cement

Ken WATANABE Mami NAKAMURA Tetsuya ISHIDA Tadatomo WATANABE

In order to cope with various design conditions of concrete structures, a prediction equation for the shrinkage strain of concrete has been developed, which allows input of the effects of cement types, aggregate shrinkage strain, and the application of liquid water, in addition to the conventionally indicated mix proportion of concrete and ambient relative humidity. The prediction equation is formulated based on the 3D material-structure interaction analysis system (DuCOM-COM3). The prediction equation can explain the phenomena that appear to be caused in part by concrete shrinkage, such as strain of concrete in prestressed concrete (PC) girders in service using blast furnace cement concrete (Class B).

キーワード：コンクリート，収縮，混合セメント，骨材の収縮ひずみ，DuCOM-COM3，降雨

1. はじめに

車両の走行性確保など、コンクリート橋りょうを確実に管理するために、今後、径間割の多様化、支間長の増加が見込まれ、気象条件も変化^{例え¹}する我が国の橋りょうの応答を、設計耐用期間にわたり推定する重要性が高まっている。また、良質な骨材の入手が困難になることの懸念に対して²、コンクリートにフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入することで構造物の耐久性を確保しようとする事例³⁾⁴⁾⁵⁾も報告されており、この影響を構造計算において考慮することが求められている。

プレストレストコンクリート(PC)桁のたわみの特徴的な増加傾向を捉えるため、構造物の部位の降水や湿度に応じた、予測式の適用方法を含む構造解析法が提示されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。収縮ひずみおよびクリープひずみ予測式について、混合セメントを用いたコンクリート⁹⁾¹⁰⁾、構造物寸法や長期材齢への適合、地域条件にも配慮した知見が求められる。特に気象条件の影響について、外気の相対湿度や、降水など水掛かりの影響により収縮ひずみが大きく低減することが報告されている¹¹⁾。また、骨材について、骨材の収縮がコンクリートの収縮ひずみに及ぼす影響が大きい¹²⁾¹³⁾。最近では、骨材の収縮ひずみを計測する事例も報告されており¹⁴⁾、今後、計測方法が標準化されることが期待される。

本研究は、コンクリート構造物の設計分野において、特に橋りょう等の設計条件を想定し、長期変位、長期変形を予測するために用いるコンクリートの収縮ひずみの

予測式を構築することを目的とする。コンクリート構造物の様々な設計条件に対応するために、従来⁷⁾⁸⁾指摘されていた材料諸元や外気相対湿度に加えて、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したセメントに対応するとともに、長期材齢への適用性を確保しつつ、水掛かりや骨材の収縮ひずみといった地域の特徴を導入できる予測式を示すものである。検討では、数年以下の実験結果では、判断が困難なスケールの構造物を設計耐用期間である100年にわたり考慮するために、実構造物における諸現象を説明可能とする材料-構造連成応答解析システム DuCOM-COM3を用いて、無筋コンクリートの解析を実施し、この解析結果に基づき定式化した。

2. DuCOM-COM3による解析

2.1 コンクリートのモデル化

DuCOM-COM3は、セメント系複合材料の硬化過程をナノからマイクロメートルスケールでモデル化して追跡する材料物理化学解析システム DuCOM と、鉄筋コンクリート構造物のひび割れと鉄筋降伏以降の損傷を扱う構造解析システム COM3 を統合したものである^{15)~18)}。

図1に、部材厚 $H=400\text{mm}$ を例に解析モデルを示す。詳細は、既報⁹⁾に示す。対象モデルは、 X 方向および Y 方向に解析対称面を有する1/4対称モデルとした。構築する予測式は、箱桁やT形桁などへの適用を想定している。箱桁やT形桁などは、複雑な断面形状がゆえに排水距離を唯一に設定することが困難であるが、桁のウェブやフランジとする部位に着目すると、2面の暴露面を有する面部材と扱うことができる。そこで、気象に関する境界条件は上下の2面の暴露面とし、その他の面

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室
** 東京大学
*** 株式会社 HRC 研究所

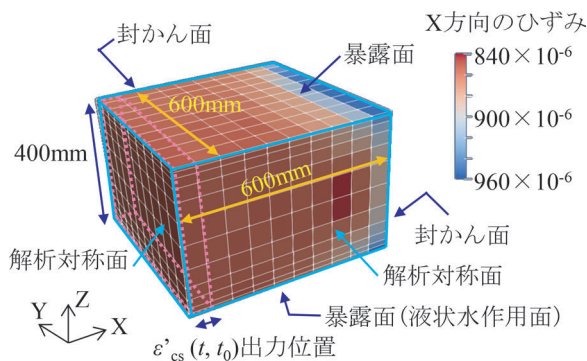


図1 1/4 対称モデルおよびX方向のひずみ分布 (H=400mmの例)¹⁹⁾

は封かんとした。断面内で平面保持を確保するため、水分逸散の方向(Z軸方向)の部材厚に対して、解析モデルの幅と奥行きを3倍に設定した。図1に、X方向のひずみ分布および検討に用いた収縮ひずみ $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ の出力位置を示す。 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は、断面内で平面保持が概ね成立している解析対称面から要素1列分のX方向のひずみを出力することとし、この平均値とした。

要素寸法の最大値は100mmとしたが、暴露面に接するコンクリートの要素は水分分布が大きく変化する可能性があるために、解析の安定性を担保できるように暴露面近傍では10mmとし、暴露面からの距離の増加につれて緩やかに大きくなるように設定した。なお、解析は、材齢約100年まで実施することを基本とした。また、コンクリートの引張強度を高く設定することで、部材表面での局所的なひび割れの発生が収縮に及ぼす影響は考慮していない。

2.2 影響因子の選定

表1に、検討した影響因子を示す。基本ケースとして、常時乾燥($t_{pre}=0$)、 $W=160\text{kg/m}^3$ 、 $\varepsilon'_{ag}=800 \times 10^{-6}$ 、乾燥開始時材齢 $t_0=7$ 日と設定し、セメント種類、 W/B 、 RH 、 H の影響を検討した。乾湿繰返し($t_{pre}>0$)の場合、セメント種N、 $W=160\text{kg/m}^3$ 、 $\varepsilon'_{ag}=800 \times 10^{-6}$ 、 $t_0=7$ 日とし、 W/B 、 H 、 RH 、液状水作用時間 t_{pre} に焦点をあてた。空気量や細骨材率、材料の密度や比表面積は標準的な値とした。普通ポルトランドセメントの鉱物組成比は、カタログ値を参考に設定した。骨材の物性として、解析では ε'_{ag} を入力可能である。骨材の吸水率は1.61%と設定した。

我が国の気象条件の特徴として、年平均湿度は概ね60%~80%、月降水時間の年平均値は概ね1.5日~4日であった²⁰⁾。そこで、解析では、2面の暴露面に作用する雰囲気湿度は同一の値とし、年平均湿度を包含する $RH=55\% \sim 85\%$ を設定した。水掛かりの影響は、主に降水によるものを想定して、図1に示す通り、2面の暴露面のうち1面にのみ液状水が作用するものとした。

表1 解析因子 (*は基本ケース)¹⁹⁾

影響因子	検討範囲
セメント種類	N*, BB, FB
W/B	0.35, 0.40, 0.50
W (kg/m ³)	145, 160*, 175
RH (%)	55, 60, 70, 85
H (mm)	100, 200, 400, 600, 1000
ε'_{ag} ($\times 10^{-6}$)	0, 400, 800*, 1200
t_0 (日)	1, 3, 7*, 14, 28, 90, 365
液状水作用時間 t_{pre}	28日間で0日*, 1日, 4日, 12日

W/B: 水結合材比, W: 単位水量, RH: 外気相対湿度, H: 部材厚, ε'_{ag} : 骨材収縮ひずみ, t_0 : 乾燥開始時材齢, N: 普通セメント, BB: 高炉セメント(置換率45%, B種相当), FB: フライアッシュセメント(置換率15%, B種相当)

2.3 常時乾燥 ($t_{pre}=0$ 日)における解析結果

常時乾燥条件における解析結果として、図2に、収縮ひずみ $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ を示す。ここで、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は、乾燥開始時材齢 t_0 から材齢 t までのひずみ変化量であり、収縮を正で表す。

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は、コンクリートが保有する水分量やその分布の変化と強い相関があるとともに、この変化する速度は、材齢、材料諸元および暴露面からの距離等に依存する²¹⁾。このコンクリート中の水分分布は、暴露面における水分のやり取りや、セメントの水和の影響で変化する。そこで、前者を水分逸散、後者を自己乾燥と表現し、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ の増加傾向(以下、経時変化)および $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ の最終値と、主な因子の影響について以下で考察する。

図2に示す通り、部材厚 H の増加に伴い、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ が長期にわたり変化する特徴を有するとともに、解析終了時の $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は減少した。 H の増加に伴い、中心部は乾燥の影響を受けにくくなることで、比較的水和反応が阻害されず進展することから、微細組織が緻密になることで乾燥収縮ひずみが小さくなるためと考えられる。

暴露面近傍では、外部への乾燥と水和による自己乾燥の両者が組み合わさることで、細孔内相対湿度 h の低下が顕著になる。部材厚が大きいと、内部があまり外部への乾燥の影響を受けないため、表面の外部への水分逸散および自己乾燥に対して、内部から水分が補填される。一方、 H が小さい場合、 h の低下に対して外気からの吸湿により補填される割合が大きく影響するため、図2(c)(f)の $H=200\text{mm}$ で確認される通り、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は減少に転ずる傾向となったと考えられる。

解析終了時の $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は、水結合材比 W/B が増加するほど増加した。 W/B の増加に伴い、コンクリートの剛性が低下し、水分逸散に伴う体積変化を抑制する力が小さくなること、およびセメントペースト中の単位水量の増加により、自己乾燥よりも水分逸散の影響が支配的となることによるものである。また、 W/B の増加に伴い、初期の材齢に伴う収縮ひずみの増加が緩やかになった。

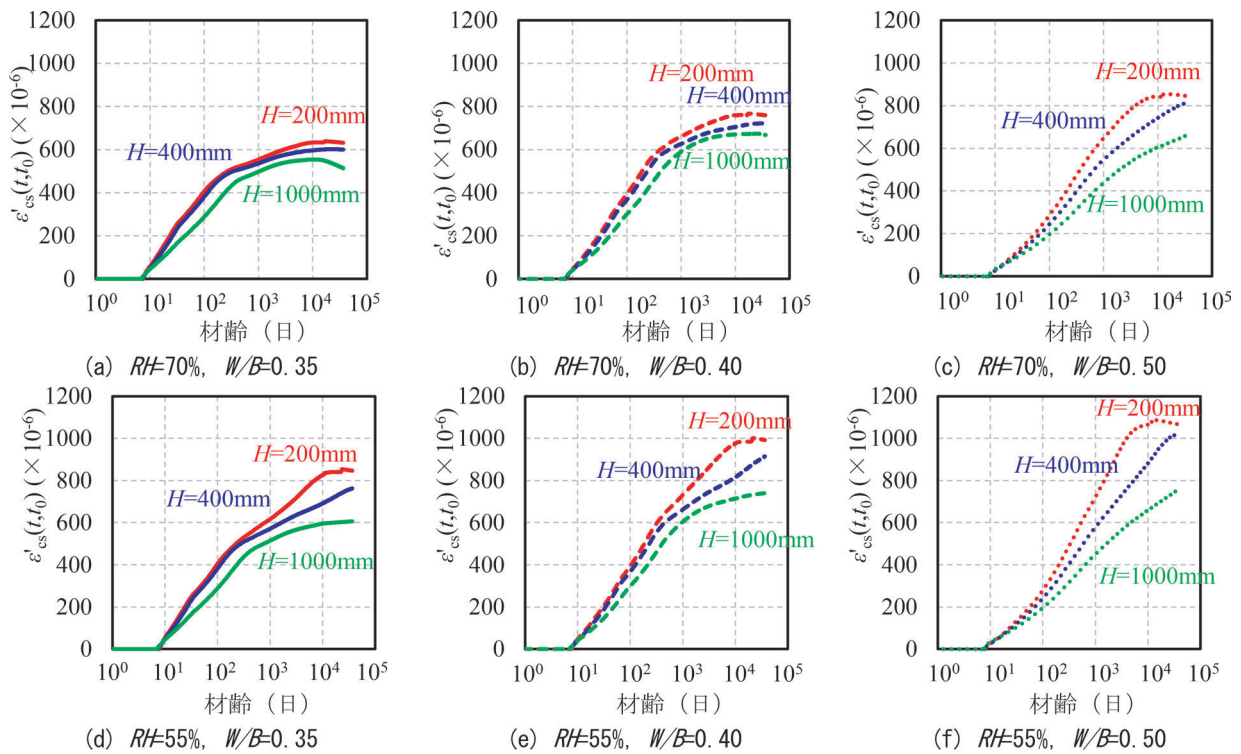


図2 収縮ひずみの経時変化 (N , $W=160 \text{ kg/m}^3$, $t_0=7$, 常時乾燥)¹⁹⁾

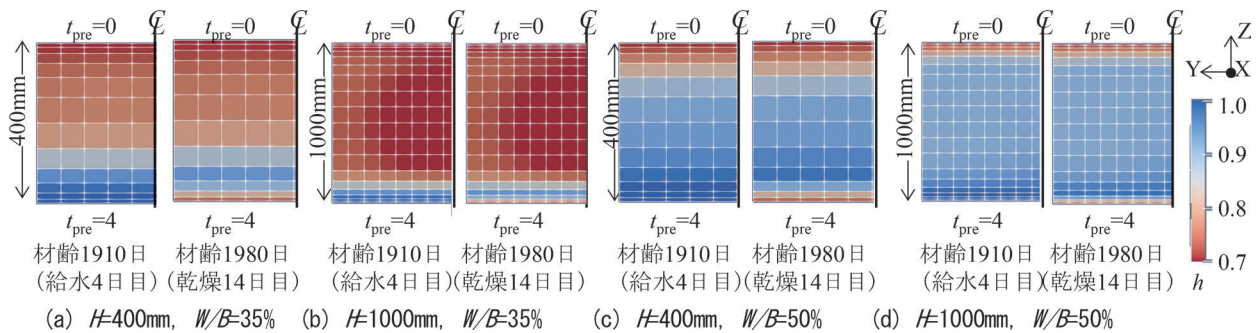


図3 コンクリート要素の細孔内相対湿度分布 (N , $RH=70\%$, 乾湿繰返し)¹⁹⁾

これは、 W/B の増加に伴い、初期の材齢における収縮挙動に支配的なメカニズムが、水和等による自己乾燥から、外気への水分逸散に移行するためである。

H が大きいケースでは、低水結合材比のコンクリートにおいて、ひずみが減少する傾向があった(図2(a))。これは、水和の進行に伴う自己乾燥が顕著になり、環境の影響を受けにくい部材内部の相対湿度が外部環境より顕著に低下し、長期的な吸湿によって収縮から膨潤に転じたためである。

単位水量 W に依存した影響は、材齢によらずほぼ一定であったことから、以降の検討では $W=160 \text{ kg/m}^3$ に固定することとした。

2.4 乾湿繰返しの解析結果

乾湿繰返しの影響を評価した解析結果として、図3

に、細孔内相対湿度 h の分布を示す。給水4日目では片側暴露面より水分が浸透するが、14日目(給水終了後14日)をみても、暴露面近傍を除き、湿潤状態が保たれている。コンクリートへの液状水の浸透速度に対して、外気への水蒸気の逸散速度が小さいため²¹⁾、月当たり降水日数が1~4日である我が国の降水条件では、水掛かりの影響をうける暴露面近傍のコンクリート中の水分逸散が進行しない。その結果、月当たりの降水日数にはあまり依存せず、含水状態が保持されると考えられる。また、図3は、 W/B にも依存して h の分布が大きく異なった。これは、 $W/B=0.50$ と比較して、 $W/B=0.35$ では、同一材齢において自己乾燥により h が低下すること、細孔構造が緻密になり、コンクリート中の水分移動速度が小さいため、降水時に浸透した水分が内部にあまり移動しないためと考えられる。

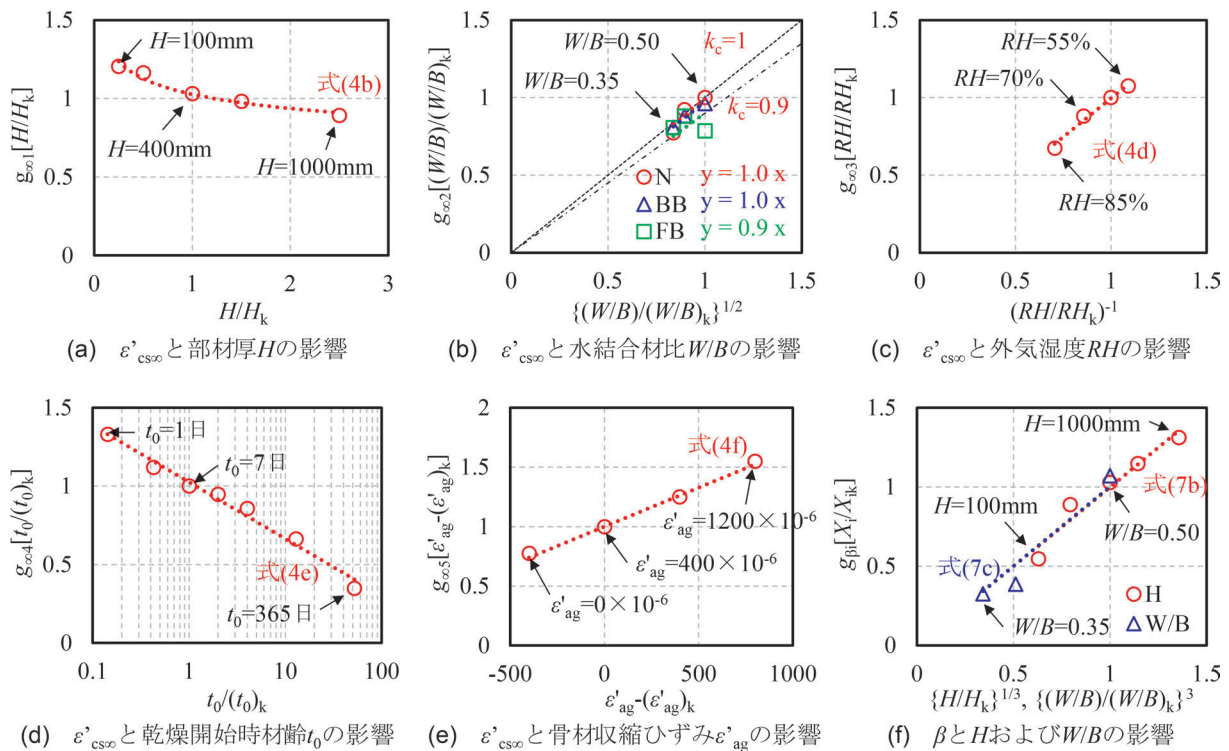


図4 $\epsilon'_{cs\infty}$ と β に及ぼす各因子の影響¹⁹⁾

3. 収縮ひずみ予測式の構築

3.1 収縮ひずみ予測式の基本思想

構築する収縮ひずみ予測式は、乾燥開始時材齢 t_0 から任意材齢 t までに生じる収縮ひずみ $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ を算出する。なお、構造物の建設工程を考えると、PC 橋りょうでは養生が終了し、乾燥が開始する時点の材齢と、プレストレスロスの算定等、構造解析において収縮を考慮し始める材齢が異なる場合もあるが、本検討における t_0 は、暴露面における外気への水分逸散が開始する材齢である。

本検討では、経時変化を表す項が一つであり、各変数の影響を包括して扱うことができるとともに、予測式の構造をより理解しやすい双曲線関数を用いて表現することとした。双曲線関数を用いた収縮ひずみ予測式は、式(1)のように表される。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \epsilon'_{cs\infty} \times \left[\frac{(t-t_0)}{\beta + (t-t_0)} \right] \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: t_0 から t までに生じるコンクリートの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $\epsilon'_{cs\infty}$: 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)、 β : 収縮ひずみの経時変化特性を表す項、である。

PC 構造物の施工では、材齢 1 日におけるプレストレス導入も想定して、乾燥開始時材齢は $t_0 \geq 1$ 日を定式化の対象とした。定式化に用いた解析値 $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ には、コンクリートの寸法、配合、材齢など設定条件に応じて

内部計算される、水和熱に起因するひずみの値も含まれている。

3.2 常時乾燥 ($t_{dre} = 0$ 日) の収縮ひずみの予測式

3.2.1 収縮ひずみの最終値 $\epsilon'_{cs\infty}$

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ の最終値 $\epsilon'_{cs\infty}$ を、式(2)を用いて示す。

$$\epsilon'_{cs\infty} = k_r \times A_{\infty 1} \times f_{\infty 1}(H) \times f_{\infty 2}(W/B) \times f_{\infty 3}(RH) \times f_{\infty 4}(t_0) \times f_{\infty 5}(\epsilon'_{ag}) \quad (2)$$

ここに、 $A_{\infty 1}$: 定数、 $f_{\infty i}(X_i)$: 因子 X_i の影響を考慮する関数、 k_r : 水掛かりの程度の影響を表す係数、である。なお、 $f_{\infty i}(X_i)$ はべき乗を基本としたが、関数形状は各因子の感度に応じて検討した。

$\epsilon'_{cs\infty}$ の標準値に対応する各諸元 X_{ik} を設定すると、式(2)は式(3)により表せる。

$$\epsilon'_{cs\infty} = k_r \times \epsilon'_{cs\infty k} \times g_{\infty 1}[H/H_k] \times g_{\infty 2}[(W/B)/(W/B)_k] \times g_{\infty 3}[RH/RH_k] \times g_{\infty 4}[t_0/(t_0)_k] \times g_{\infty 5}[\epsilon'_{ag} - (\epsilon'_{ag})_k] \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon'_{cs\infty k}$: 収縮ひずみの最終値の標準値、 $g_{\infty i}[X_i/X_{ik}]$: $f_{\infty i}(X_i)$ を各諸元 X_{ik} で正規化した関数、である。

$\epsilon'_{cs\infty k}$ に対応する諸元 X_{ik} は、一般的な構造物の条件を想定し、 $H_k = 400\text{mm}$ 、 $(W/B)_k = 0.50$ 、 $RH_k = 60\%$ 、 $(t_0)_k = 7$ 日、 $(\epsilon'_{ag})_k = 400 \times 10^{-6}$ とした。

図4に、 $\epsilon'_{cs\infty}$ と β に及ぼす各因子の影響として、

DuCOM-COM3 による解析結果より得られた、 $g_{\infty i}[X_i/X_{ik}]$ と X_i/X_{ik} の関係を示す。図中には、式 (4) による予測値を併せて示す。

図 4 (a) に、 H の影響を示す。 $H=100\sim 1000\text{mm}$ 、材齢 100 年とした本検討では、 H の増加に伴い、 $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ は減少した。そして、解析値を参考に、 H の増加に伴う $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ の減少は徐々に鈍化する関数で表すこととした。

図 4 (b) に W/B の影響を示す。 $W/B=0.35\sim 0.50$ では、 $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ は $W/B^{1/2}$ に比例して増加した。また、 N を用いたコンクリートに対して、 BB は同程度、 FB ではやや小さくなる傾向を示した。これは、実験的知見ではあるが、高炉セメント B 種に対する報告⁹⁾ や、フライアッシュの混入により乾燥収縮がやや低減されるという報告¹⁰⁾¹¹⁾ とも整合する。そこで、 N と BB は一致することとし、 FB は N の 0.9 倍として表すこととした。

図 4 (c) に RH の影響を示す。 RH の低下に伴い $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ は増加した。図中の式 (4d) は、標準的な外気相対湿度での予測精度を優先して $RH=55\%\sim 70\%$ のデータを用いて定めたが、 RH^{-1} に比例する関数を用いることで、 $RH=85\%$ の解析結果も配慮して表すこととした。

図 4 (d) に乾燥開始時材齢 t_0 の影響を示す。 t_0 の増加に伴い $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ は減少した。乾燥開始までに封かん状態で水和反応が進行することで、乾燥開始が遅くなるほど乾燥開始時材齢での h が低下する。さらには、微細組織が緻密になることで水分移動速度が低下する結果、乾燥開始以降の気中への水分逸散量が減少するためと考えられる。ここでは、対数に対して、単調に減少する関数を用いて表すこととした。

図 4 (e) に、粗骨材の収縮ひずみ ε'_{ag} の影響を示す。 $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ は、 ε'_{ag} の増加に伴い単調に増加した。そこで、 ε'_{ag} に対して、線形の関数を用いて表すこととした。

以上、各因子 X_{ik} の影響を表す関数 $g_{\infty 1}[H/H_k] \sim g_{\infty 5}[\varepsilon'_{\text{ag}} - (\varepsilon'_{\text{ag}})_k]$ が、 $\varepsilon'_{\text{cs}\infty k}$ に対応する各諸元において 1 となるように、各関数の係数および定数を決定した。得られた $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}$ の各項を式 (4a)～式 (4g) に示す。

$$\varepsilon'_{\text{cs}\infty k} = 710 \quad (4a)$$

$$g_{\infty 1}[H/H_k] = (H/H_k)^{-1/10} \quad (4b)$$

$$g_{\infty 2}[(W/B)/(W/B)_k] = k_c \times \{(W/B)/(W/B)_k\}^{1/2} \quad (4c)$$

$$g_{\infty 3}[RH/RH_k] = (RH/RH_k)^{-1} \quad (4d)$$

$$g_{\infty 4}[t_0/(t_0)_k] = -0.16 \times \log \{t_0/(t_0)_k\} + 1 \quad (4e)$$

$$g_{\infty 5}[\varepsilon'_{\text{ag}} - (\varepsilon'_{\text{ag}})_k] = 0.0007 \times \{\varepsilon'_{\text{ag}} - (\varepsilon'_{\text{ag}})_k\} + 1 \quad (4f)$$

$$k_c = 1(N, BB), 0.9(FB) \quad (4g)$$

ここに、 k_c ：セメント種類を考慮する係数、である。

3.2.2 収縮ひずみの経時変化特性 β

2 章で示した通り、主な影響因子である H や W/B を用いて、 β は式 (5) により示すこととした。

$$\beta = A_{\beta 1} \times f_{\beta 1}(H) \times f_{\beta 2}(W/B) \quad (5)$$

ここに、 $A_{\beta 1}$ ：定数、 $f_{\beta 1}(X_i)$ ：因子 X_i の影響を考慮する関数、である。

式 (5) は、収縮ひずみの最終値の標準値 $\varepsilon'_{\text{cs}\infty k}$ に対応する各諸元 X_{ik} を設定すると、式 (6) により表せる。

$$\beta = A_{\beta} \times g_{\beta 1}[H/H_k] \times g_{\beta 2}[(W/B)/(W/B)_k] \quad (6)$$

ここに、 A_{β} ：定数、 $g_{\beta 1}[X_i/X_{ik}]$ ： $f_{\beta 1}(X_i)$ を各諸元 X_{ik} で正規化した関数、である。

図 4 (f) に、DuCOM-COM3 の解析結果を用いて、 $g_{\beta 1}[H/H_k]$ と H/H_k 、 $g_{\beta 2}[(W/B)/(W/B)_k]$ と $(W/B)/(W/B)_k$ の関係および式 (7b) (7c) の予測値を示す。なお、式 (6) は、基本ケースのデータを用いて定式化した。図 4 (f) に示す通り、 H の増加に伴い β が増加した。これは、収縮ひずみが長期にわたり増加することを示している。

β について、拡散理論に基づき H の二乗に比例する算定式が報告されている⁷⁾。一方、図 4 (f) は、 H の影響は、水分移動係数を唯一の値とした拡散理論に従うと仮定した場合よりもやや小さい結果となった。これは、含水状態や水和に応じて、水分移動係数が材齢に依存して変動する²²⁾ ため、水分移動係数を唯一の値とした方法と差異が生じたものと考えられる。

また、 W/B が小さいと、自己収縮が卓越する材齢初期において、材齢に伴う $\varepsilon'_{\text{cs}}(t, t_0)$ の増加が比較的大きい傾向を示した (図 2)。この傾向を表すために、 W/B が小さいほど β を小さく設定した (図 4 (f))。そして、 $g_{\beta 1}[H/H_k]$ および $g_{\beta 2}[(W/B)/(W/B)_k]$ が、収縮ひずみの標準値に対応する各諸元において 1 となるように、関数の係数および定数を決定した。得られた β の各項を式 (7a)～式 (7c) に示す。

$$A_{\beta} = 340 \quad (7a)$$

$$g_{\beta 1}[H/H_k] = (H/H_k)^{1/3} \quad (7b)$$

$$g_{\beta 2}[(W/B)/(W/B)_k] = \{(W/B)/(W/B)_k\}^3 \quad (7c)$$

3.3 予測式における水掛かりの影響の考慮

水掛かりの影響は 2 つの暴露面のうち 1 面のみとしており、水分供給に関する境界条件は非対称であるため、図 4 (c) に示す RH が $\varepsilon'_{\text{cs}}(t, t_0)$ に及ぼす影響とは異なる傾向を示す。そこで、式 (3) の、水掛かりの影響を表す係数 k_r は、材齢 2000 日時点での、液状水が作用しない際の収縮ひずみに対する、液状水が作用する際の収縮ひずみの比率で表すこととし、 $W/B=0.50$ の値を参考に、 $H=200\text{mm}$ で 0.5、 $H=400\text{mm}$ で 0.6、 $H=1000\text{mm}$ で 0.8 とした。

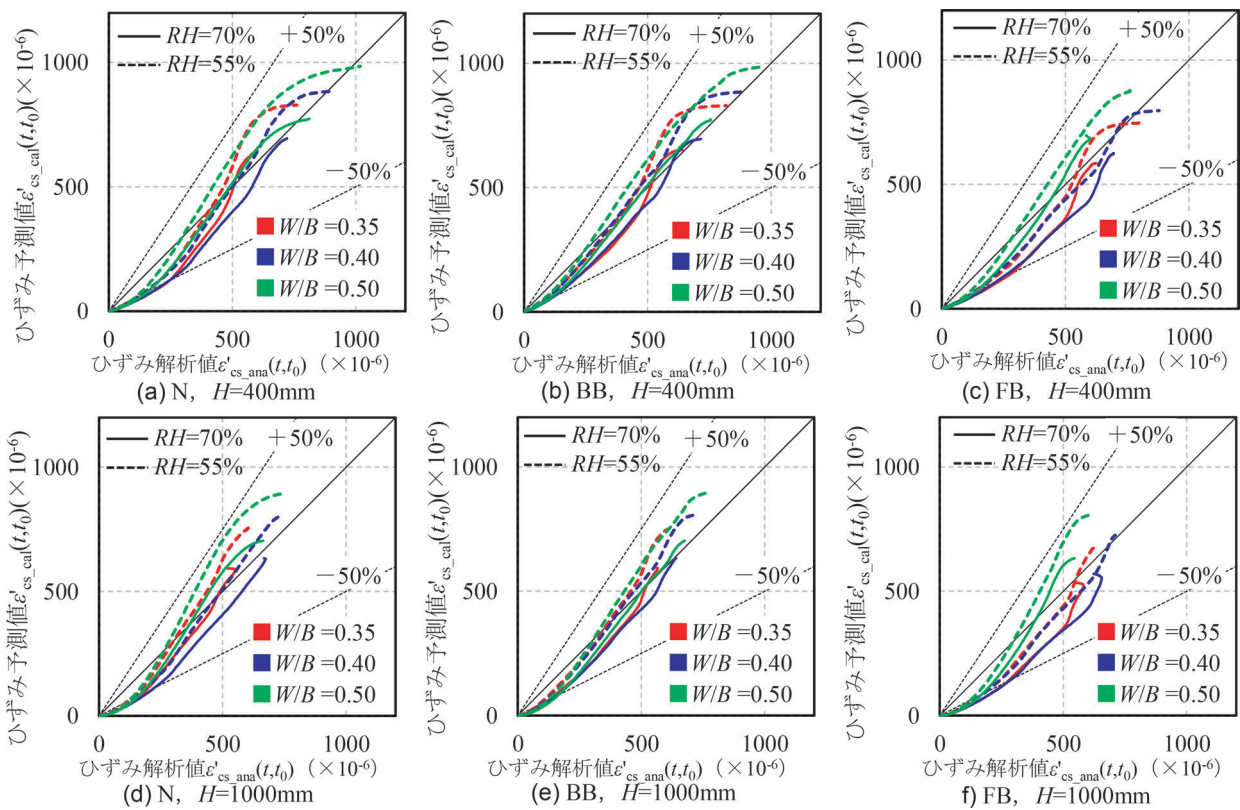


図5 式(8)による予測値および解析値の比較(基本ケース, 常時乾燥, $\varepsilon'_{ag}=800(\times 10^{-6})$)

3.4 予測式およびその特徴

以上, 式(4)および式(7)に, $\varepsilon'_{cs\infty}$ の標準値に対応する各諸元 $(W/B)_k=0.50$, $RH_k=60\%$, $(t_0)_k=7$ (日), $(\varepsilon'_{ag})_k=400(\times 10^{-6})$ を代入して, 式(8a)~式(8g)が得られる。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \varepsilon'_{cs\infty} \times \left[\frac{(t-t_0)}{\beta + (t-t_0)} \right] \quad (8a)$$

$$\varepsilon'_{cs\infty} = k_r \times 600 \times (H/H_k)^{-1/10} \times k_c \times (W/B)^{1/2} \times (RH/100)^{-1} \times k_{t_0} \times k_{ag} \quad (8b)$$

$$k_r = 1.0 \text{ (常時乾燥)} \\ = 0.8 \text{ (乾湿繰返し, } H=1000\text{mm)} \\ = 0.6 \text{ (乾湿繰返し, } H=400\text{mm)} \\ = 0.5 \text{ (乾湿繰返し, } H=200\text{mm)} \quad (8c)$$

$$k_c = 1.0 \text{ (N, BB)} \\ = 0.9 \text{ (FB)} \quad (8d)$$

$$k_{t_0} = -0.16 \times \log(t_0/7) + 1 \quad (8e)$$

$$k_{ag} = 0.0007 \times (\varepsilon'_{ag} - 400) + 1 \quad (8f)$$

$$\beta = 2700 \times (H/H_k)^{1/3} \times (W/B)^3 \quad (8g)$$

ここに, $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: 材齢 t_0 から t までのコンクリートの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$), t : コンクリートの材齢 (日), t_0 : コンクリートの乾燥開始時材齢 (日) ($1 \leq t_0 \leq 365$), $\varepsilon'_{cs\infty}$: 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$), k_r : 水掛かりの程度の影響を表す係数, RH : 外気相対湿度 (%), ($55\% \leq RH \leq 85\%$), k_c : セメント種類の影響を表す係数, H :

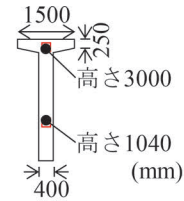
部材厚 (暴露面間の距離) (mm) ($100 \leq H \leq 1000$), H_k : 標準部材厚 (mm) (=400mm), k_{t_0} : 乾燥開始時材齢の影響を表す係数, k_{ag} : 粗骨材の収縮の影響を表す係数, ε'_{ag} : 骨材の絶乾状態における収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$) ($0 \leq \varepsilon'_{ag} \leq 1200$), β : 収縮ひずみの経時変化特性を表す項, W/B : 水結合材比 ($0.35 \leq W/B \leq 0.50$), である。式(8)は, 単位水量 $W=160\text{kg/m}^3$, 2面乾燥条件下を対象とした解析結果を基に検討した。水掛かりの影響は2面のうち1面にのみ考慮し, 28日あたりの液状水作用時間 t_{pre} は4日程度以下である。

図5に, 式(8)による予測値を, DuCOM-COM3の解析値と比較した例を示す。なお, ここでは $\varepsilon'_{ag}=800 \times 10^{-6}$ とした。解析値は ε'_{ag} に対して線形的に増減するとともに, この関係は材齢や W/B の影響を受けないことが明らかであるため, 図5では比較を省略している。式(8)は, プレストレストコンクリート(PC)構造物で一般的な, $H=400-1000\text{mm}$, $RH=70\%$, $W/B=0.40$ に照準を合わせて定式化したものである。特に, BBおよびFB, 部材厚 $H(=1000\text{mm})$ および低い水結合材比 $W/B(=0.35)$ において, 収縮ひずみを捉えている。

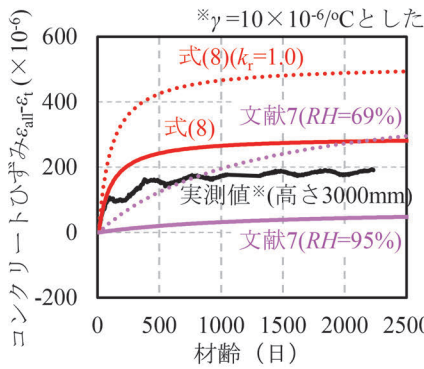
式(8)は, 算定精度が各影響因子に依存しないように, 構造物の変形を長期にわたって捉えることを目指して定式化したものだが, $RH=55\%$ では, 特に $H \geq 400\text{mm}$ において, 解析値に対してやや早い材齢で収縮ひずみの



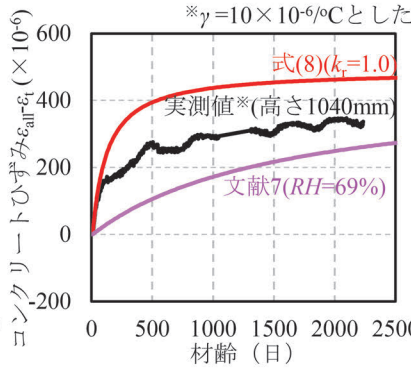
(a) 単純PCT形2主桁²³⁾



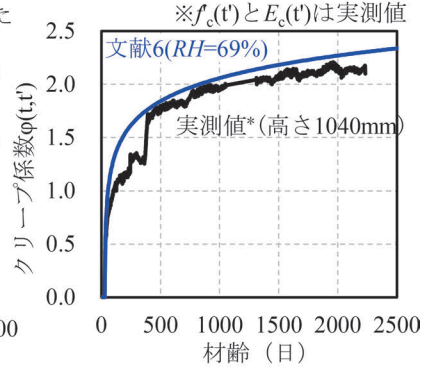
(b) 断面(支間中央)



(c) 収縮ひずみ(高さ3000mm)



(d) 収縮ひずみ(高さ1040mm)



(e) クリープ係数(高さ1040mm)

図6 高炉セメントB種を用いたPC桁の計測値と算定値¹⁹⁾

最終値 ϵ'_{∞} に漸近するように計算される。その場合も、 ϵ'_{∞} については、解析値を捉えられるように定式化した。

DuCOM-COM3 の解析値では、例えば、 $H=1000\text{mm}$ で W/B が小さい場合、材齢の増加に伴い収縮ひずみが減少に転じる結果がみられた。この要因は2章で述べた通りだが、FB および BB では、水和による自己乾燥が大きいので、その傾向が強くなる。式(8)ではこのひずみの減少を忠実に再現するものではないが、概ね解析値を捉えられるように ϵ'_{∞} を定式化している。

4. PC 橋桁における計測値と予測値の比較

対象構造物は、単純PCT形2主桁(支間長38.25m)のうちの1主桁である。セメントにはBBを使用しており、コンクリートの呼び強度45、 $W/B=0.352$ 、 $W=154\text{kg/m}^3$ であった²³⁾。計測地点付近の気温および相対湿度の年平均値の平年値は、それぞれ18.6℃、69.3%²⁰⁾であった。

図6に、PC桁の上フランジとウェブに配置した、無応力計により計測したコンクリートのひずみ、および予測値を示す。図6(c)(d)に示す通り、 H が小さいにも関わらず、材齢に伴う上フランジの計測値の増加は、ウェブの計測値に対して小さくなっており、主に水掛かりの影響により、収縮ひずみが抑制される結果が確認された。

予測値は、材料の諸元、気象条件、施工条件などは、実施工を考慮して算定した²³⁾。上フランジおよびウェブ

は、2つの暴露面を有する部位とし、その厚さを H とした。気象条件のモデル化では、ウェブを常時乾燥⁶⁾として、上フランジを桁上面の暴露面に水掛かりの影響があることを想定して乾湿繰返し⁶⁾とした。

式(8)による予測値では、 $RH=69\%$ (相対湿度の年平均値の平年値)とした。 k_r は、常時乾燥では $k_r=1(t_{pre}=0)$ 日、乾湿繰返しでは H に応じて定めた。 ϵ'_{ag} は実測値がないため、図中では $\epsilon'_{ag}=400 \times 10^{-6}$ とした。また、図中には、文献7の予測値を参考までに示す。この場合、常時乾燥では $RH=69\%$ 、乾湿繰返しでは $RH=95\%$ とした。

式(8)による予測値は、材齢2000日程度までのBBの計測値に対して、部位(上フランジ、ウェブ)に依存した水掛かりの影響が、材齢の増加に伴う収縮ひずみの増加に及ぼす特徴を捉えている。

計測値は、暴露面から約200mm位置の断面中央の代表値であるだけでなく、降水が暴露面に作用した可能性や、また、外気相対湿度が日変動を繰り返す実環境の場合、外気との水のやり取りでは、吸湿速度に対して逸散速度が小さい。その結果、外気相対湿度を平年値とした場合の予測値に対して、湿潤状態が確保された可能性がある¹³⁾。したがって、 ϵ'_{ag} の影響のほかに、定式化した式(8)に、相対湿度の年平均値の平年値を RH に用いた予測値は、やや過大となった可能性が考えられる。

ところで、本稿ではクリープ係数について述べていないが、図6(e)は、計測位置1040mmにおいて計測した鉄筋のひずみ、収縮ひずみ、荷重履歴を考慮して算出

したクリープ係数、および示方書によるクリープ係数の予測値⁶⁾を示す。なお、計測した圧縮強度およびヤング係数を用いて、算出している。予測値は、計測値の増加する傾向をよく捉えていることから、式(8)による収縮ひずみとクリープ係数を用いた予測値⁶⁾の和は、構造物に生じている材齢約2000日までのコンクリートのひずみを評価するとともに、BBのクリープ係数は、材齢に伴うBBの圧縮強度およびヤング係数を適切に評価することで、既存の式⁶⁾を用いても捉えられる可能性を示唆している。

5. まとめ

3次元材料-構造連成応答解析システム DuCOM-COM3の解析値の分析の結果、材齢100年では、普通セメントコンクリート(N)の収縮ひずみに対して、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリート(B種, BB)は同程度、フライアッシュを混入したコンクリート(B種, FB)は、やや小さくなる傾向を示した。また、材齢100年のコンクリートの収縮ひずみは、骨材収縮ひずみに比例した。

コンクリート構造物の設計に用いるための、コンクリートの収縮ひずみの予測式を、DuCOM-COM3の解析値に基づき構築した。双曲線関数を用いた予測式は、従来指摘されていた配合や外気相対湿度に加えて、BBおよびFBに対応するとともに、外気相対湿度、水掛かりの影響および骨材の収縮ひずみといった地域性の影響を入力可能である。部材厚の大きい、あるいは低水結合材比のコンクリートを含めて、収縮ひずみの長期材齢への適用性を確保している。

提案した予測式は、BBを用いた供用中のPC桁に生じている、コンクリートの収縮が一因とみられるひずみの増加を説明できることを確認した。

謝辞

DuCOM-COM3を用いた解析の検討にあたっては、株式会社コムエンジニアリング土屋智史氏、米津薫氏にご助言を賜った。ここに謝意を表す。

文献

- 1) 気象庁：地球温暖化予測情報 第9巻, 2017
- 2) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会：新技術開発報告 No.42 乾燥収縮に関する実態調査結果報告書 H24年度, 2013
- 3) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：報告書, 2013
- 4) 石川太郎, 井上翔, 加藤寛之：北陸新幹線におけるフライアッシュコンクリートの適用の試験施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.123-128, 2018
- 5) 井口重信, 小林將志, 松田芳範, 野澤伸一郎：鉄道構造物に対する新しい ASR 対策と混和材を活用した事例, コンクリート工学, Vol.57, No.7, pp.498-503, 2019
- 6) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2018
- 7) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦：コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.421-437, 2013
- 8) 渡邊忠朋, 土屋智史, 坂口淳一, 笠井尚樹：断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.207-226, 2013
- 9) セメント協会コンクリート専門委員会：各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮に関する実験結果, セメント・コンクリート, No.774, pp.3-9, 2011
- 10) 中川隆夫, 大野義照, 徐泰錫, 松田成貴：フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.483-488, 2004
- 11) 浅本晋吾, 大塚歩, 三浦千佳子, 桑原勇太：実環境下におけるコンクリートの収縮, 収縮ひび割れ挙動に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.2, pp.35-43, 2010
- 12) 後藤幸正, 藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, 第286号, pp.125-137, 1979
- 13) 寺西浩司, 丸山一平, 齊藤和秀, 平岩陸, 森堅太郎：コンクリートの乾燥収縮ひずみの推定と収縮ひび割れ対策の選定—ASCoT「コンクリートの収縮ひび割れ研究委員会」の成果報告一, コンクリート工学, Vol.49, No.11, pp.8-16, 2011
- 14) 山田宏, 片平博, 渡辺博志：粗骨材の収縮特性の評価に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.1, pp.63-71, 2012
- 15) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T., "Multi-Scale Modeling of Structural Concrete," Taylor and Francis, 2008
- 16) Ohno, M., Chijiwa, N., Suryanto, B. and Maekawa, K., "An Investigation into the Long-Term Excessive Deflection of PC Viaducts by Using 3D Multi-scale Integrated Analysis," J. of Advanced Concrete Technology, Vol.10, pp. 47-58, 2012
- 17) 石田哲也, Luan, Y.: 水和収縮と細孔内水分の形態に立脚した収縮駆動モデルの再構築, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.4, pp.422-436, 2012
- 18) 米田大樹, 石田哲也, 前川宏一, Gebreyouhannes, E., 三島徹也：コンクリートの微視的損傷および細孔内水分に着目した準微細ひび割れモデル, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.71, No.3, pp.263-282, 2015

- 19) 渡辺健, 中村麻美, 石田哲也, 渡邊忠朋: 混合セメントおよび水掛かりの影響を考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式の提案, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.78, No.1, pp.105-120, 2022
- 20) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (参照日: 2020年11月4日)
- 21) 中村麻美, 渡辺健, 大野又稔, 安保知紀: 吸水現象の時間依存性を考慮した水分移動モデルとコンクリートの変形予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.435-440, 2018
- 22) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, 第420号/V-13, pp.61-69, 1990
- 23) 中村麻美, 渡辺健, 大野又稔: 高炉セメントを用いたPC桁の収縮クリープの特性と駆動力に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.437-442, 2019